[CORROSÃO DE LIGAS PARA DUTOS DE PETRÓLEO E GÁS

Késia Simões Ribeiro[1]
Tamara da Silva Tavares dos Reis[1]
Davi Braga Garcia Amaral[2]
Brenno Pimentel Zanandrea[2]
Marco Thúlio Soares Kossooski[2]
Eduardo Calderari da Silveira e Palos[2]
Lucas Lettiéri Proença[2]
Bernardo Papaléo Pereira Ribeiro[2]
Carlos Nelson Elias[3]

Resumo
Na indústria petrolífera, os dutos metálicos são utilizados para o transporte de petróleo entre plataformas e refinarias. Devido às condições agressivas do ambiente marinho, como temperatura, pressão e salinidade, é essencial a seleção de ligas metálicas com elevada resistência à corrosão. Alicerçado nisso, este trabalho teve como objetivo avaliar o comportamento à corrosão das ligas Inconel 625, aço inoxidável 316L e aço duplex 2205 em meio salino. Portanto, foram realizados ensaios eletroquímicos de potencial de circuito aberto (OCP) e de polarização potenciodinâmica, utilizando uma solução de 3,5% NaCl em temperatura ambiente, simulando ambiente marinho. O aço duplex 2205 apresentou maior resistência à corrosão, com ampla passivação, o Inconel 625 teve desempenho intermediário e o aço 316L apresentou maior suscetibilidade à corrosão por pites.
Palavras-chave: Corrosão; Inconel 625; Aço inoxidável 316L; Aço duplex 2205.

Corrosion of alloys for oil and gas pipelines

Abstract
In the oil industry, metallic pipelines are used to transport crude oil between offshore platforms and refineries. Due to the harsh conditions of the marine environment, such as temperature, pressure, and salinity, the selection of metallic alloys with high corrosion resistance is essential. Based on this, the present study aimed to evaluate the corrosion behavior of Inconel 625, 316L stainless steel, and 2205 duplex stainless steel in a saline environment. To this end, electrochemical tests of open circuit potential (OCP) and potentiodynamic polarization were performed using a 3.5% NaCl solution at room temperature, simulating a marine environment. Duplex steel 2205 exhibited the highest corrosion resistance with a wide passivation range, Inconel 625 showed intermediate performance and 316L steel was more susceptible to pitting corrosion.
Keywords: Corrosion; Inconel 625; 316L stainless steel; 2205 duplex stainless steel.

[1] *Engenheira Metalúrgica, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.*
[2] *Graduando em Engenharia, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ, Brasil*
[3] *Engenheiro Metalúrgico, Doutor, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.*

1 INTRODUÇÃO

Os dutos de óleo são largamente aplicados nas indústrias petrolíferas com a finalidade de otimizar a logística de transporte do petróleo das plataformas de extração para as refinarias. A fim de assegurar um transporte eficiente e seguro, devido às condições adversas encontradas em ambiente marítimo, é necessário que estes sejam projetados para oferecer elevada resistência à corrosão [1].

Tal necessidade provém da propensão à corrosão metálica, um processo eletroquímico que acontece de forma espontânea resultando na degradação de metais por meio de reações de oxidação e redução [2].

As ligas inconel 625, aço inoxidável 316L e aço duplex 2205 são amplamente utilizadas nas indústrias de petróleo e gás. O aço inoxidável 316L é uma liga austenítica frequentemente empregado em dutos de petróleo devido às suas propriedades mecânicas, como sua alta ductilidade e tenacidade, além de sua elevada resistência à corrosão. Sua composição química é composta por altos teores de níquel e cromo que garantem sua resistência à corrosão, enquanto a presença de molibdênio contribui para a resistência à corrosão por pites [3].

A liga inconel 625, uma superliga austenítica, é comumente utilizada como material de revestimento, apresentando melhor performance nesta aplicação quando comparada a metais como zinco ou alumínio. Com uma composição química à base de níquel que proporciona ductilidade, tenacidade e estabilidade química, além de cromo e molibdênio, que, assim como no aço 316L, contribuem para a proteção contra a corrosão e ainda a adição de nióbio que aumenta sua resistência à fluência [4].

Devido às suas excelentes propriedades mecânicas e elevada resistência à corrosão, o aço duplex 2205 tem sido largamente aplicados em uma variedade de setores industriais, incluindo construção naval, exploração de petróleo em águas profundas, indústria química, papel e celulose, petroquímica, dessalinização, bem como nas indústrias de óleo e gás. Esse material apresenta uma microestrutura bifásica, com fase austenítica e ferrítica. Os elementos níquel e nitrogênio estabilizam a fase austenítica favorecendo o aumento da dureza e da resistência à corrosão, enquanto o cromo e o molibdênio estabilizam a fase ferrítica, que possibilita a resistência à corrosão [5].

Suas características desejáveis se dão, principalmente, pela formação de uma camada densa e aderente de óxido de cromo em sua superfície, que age como um filme protetor.

A água do mar é um ambiente extremamente agressivo, sendo de grande importância que as ligas utilizadas apresentem resistência à corrosão, principalmente quando se trata de interação com os íons cloreto (Cl^-), promove a quebra da camada protetora resultando em uma corrosão por pite [6]. No qual, constitui um dos principais mecanismos de degradação em ligas que são submetidas a ambientes contendo íons cloreto. Nesse processo, os Cl^- são adsorvidos na camada de óxido, favorecendo a nucleação de pites em regiões com heterogeneidades. A diferença de potencial origina uma célula eletroquímica, entre a cavidade metálica - região ativa - e a superfície adjacente - região passiva - promovendo a dissolução localizada do metal [7].

Contudo, o objetivo deste trabalho é avaliar e comparar a resistência à corrosão das ligas inconel 625, aço duplex 2205 e aço inoxidável 316L utilizados na indústria offshore em meio simulando o ambiente salino, com 3,5% de NaCl em temperatura ambiente.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Materiais e Métodos

2.1.1 Materiais

No presente estudo, analisaram-se três ligas amplamente utilizadas na confecção de componentes metálicos, com ênfase em aplicações na indústria de petróleo e gás. As ligas em foco são o inconel 625, conforme especificado na norma ASTM B444 GR.1 (UNS N06625), o aço duplex 2205, conforme estabelecido na norma ASTM A790 e o aço inoxidável 316L, conforme estipulado pela norma ASTM A312. As composições químicas das ligas, conforme as normas mencionadas, estão detalhadas nas Tabelas 1, 2 e 3, respectivamente.

Tabela 1. Composição química da liga inconel 625 (%) [8].

C	Fe	Cr	Ni	Mo	Nb	Mn	Tl	Al	Si
0,10 máx	5,00 Máx	20,0-23,0	58,0 Mín	8,0-10,0	3,15-4,15	0,5 Máx	0,4 máx	0,4 máx	0,5 máx

Tabela 2. Composição química do aço duplex 2205 (%) [9].

C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo
0,03	2,0	0,03	0,02	1,0	21,0-23,0	4,5-6,5	2,5-3,5

Tabela 3. Composição química do aço 316L (%) [10].

C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo
0,03	2,0	0,045	0,03	0,03	16,0-18,0	10,0-14,0	2,0-3,0

2.1.2 Procedimentos

Para os ensaios eletroquímicos, as amostras foram inicialmente seccionadas, interligadas por fio de cobre e embutidas em resina acrílica. Após a polimerização da resina, realizou-se o lixamento com lixas de carboneto de silício (SiC) de granulometria variando de 80 a 2000 mesh, a fim de obter uma superfície uniforme e livre de defeitos. Depois de cada teste eletroquímico, as amostras foram novamente submetidas a um novo ciclo de lixamento.

2.1.3 Ensaios Eletroquímicos

Foram realizados ensaios eletroquímicos, com um potenciostato/galvanostato Autolab PGSTAT 204N, para avaliar a resistência à corrosão das ligas. Empregou-se uma célula convencional de três eletrodos, na qual as amostras metálicas funcionaram como eletrodos de trabalho, um fio de platina serviu como contraeletrodo e um eletrodo de calomelano saturado (SCE) atuou como referência. Como eletrólito, foi empregada uma solução contendo cloreto de sódio a 3,5%, simulando o ambiente marinho. Os testes foram conduzidos à temperatura ambiente.

Os ensaios eletroquímicos incluíram a medida do potencial de circuito aberto (OCP) e ensaios de polarização potenciodinâmica. O OCP foi monitorado por 3600 segundos após a imersão das amostras no meio corrosivo. A taxa de varredura foi

fixada em 0,001 V/s, abrangendo uma faixa de potencial de -0,5 V a 0,9 V. Os testes foram conduzidos em triplicata.

3. Resultados e Discussão

O potencial de circuito aberto (OCP) corresponde ao potencial de equilíbrio do material quando este está imerso no eletrólito. Os resultados para os valores de OCP para a liga inconel 625, o aço duplex 2205 e o aço inoxidável 316L na solução de 3,5% de NaCl em temperatura ambiente encontram-se na Tabela 3. Ao longo de 3600 segundos acompanhou-se a evolução do potencial de circuito aberto; observou-se um valor de OCP do aço duplex 2205 para valores mais positivos, o que reflete o crescimento da camada passiva de óxido na superfície do material e uma melhor estabilidade eletroquímica no meio salino. Esse fenômeno indica que o aço duplex 2205 assume um comportamento mais nobre e maior resistência à corrosão em função da estabilidade da camada de óxido passiva [11]. Enquanto que o inconel 625 apresentou um valor de OCP mais negativo que o aço inoxidável 316L, o que representa uma menor estabilidade da camada de óxido e uma menor resistência à corrosão comparado com as outras ligas.

Tabela 3. Medida de Potencial de Circuito Aberto das ligas estudadas na solução 3,5% NaCl.

Liga metálica	OCP (V)
Inconel 625	-0,2564
Aço Duplex 2205	-0,1501
Aço inoxidável 316L	-0,1880

As curvas de polarização potenciodinâmica obtidas para as amostras do aço inoxidável 316L, o aço duplex 2205 e a liga inconel 625 na solução 3,5% de NaCl à temperatura ambiente encontram-se representadas na Figura 1.

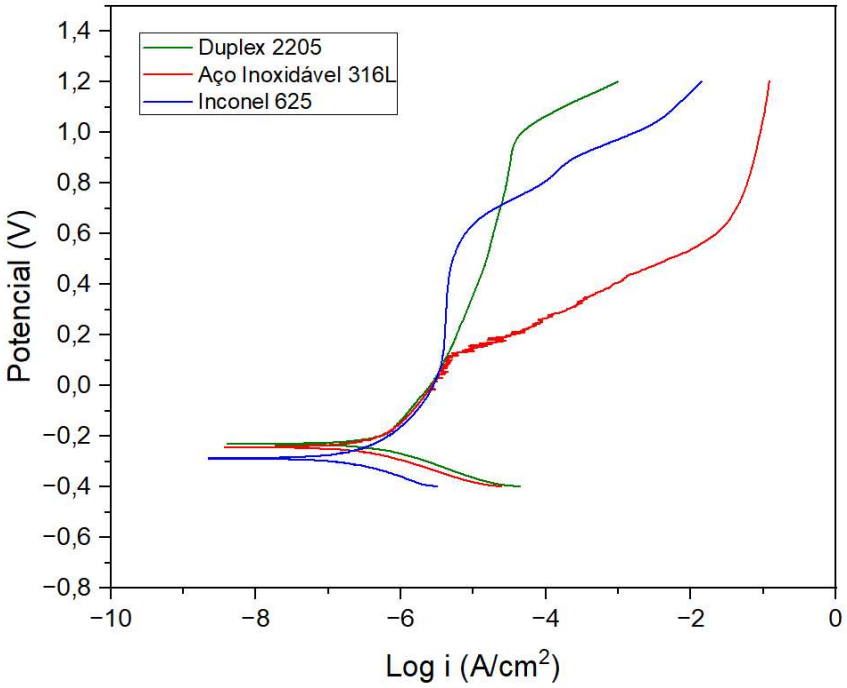

Figura 1. Curvas de polarização potenciodinâmica das ligas estudadas na solução de 3,5% de NaCl em temperatura ambiente.

Observa-se, na Figura 1, que as três ligas possuem uma região de passivação, característica comum de ligas que apresentam formação de um filme de óxido passivo em sua superfície. Além disso, na região anódica, o aço duplex 2205 foi o que apresentou a maior região passiva, caracterizada pelo aumento de potencial mantendo-se a densidade de corrente aproximadamente constante. Isso indica que este aço possui uma camada de óxido mais estável quando comparada às outras ligas, apresentando uma resistência contínua ao metal contra a corrosão do meio, corroborando com os valores de OCP [12].
Por outro lado, ainda analisando a região anódica, o aço inoxidável 316L foi o que apresentou a menor região de passivação, o que indica uma camada de óxido menos estável se comparado à liga inconel 625 e o aço duplex 2205. Além disso, tal metal apresentou um potencial de pite (E_{pit}) em aproximadamente 0,1 V, evidenciada por pontos de corrosão na amostra após o ensaio de polarização. A partir desse potencial, houve uma redução da eficiência do filme de óxido formado na superfície do metal ocasionando a corrosão localizada por pites. Os íons halogenados, como o cloreto presente na solução salina, desestabilizam a camada protetora de óxido em pontos de heterogeneidade, favorecendo o ataque localizado. Quando essa camada se rompe localmente, forma-se uma célula eletroquímica: a região anódica corresponde à porção do metal desprotegida, enquanto a região catódica abrange a maior área ainda coberta pelo filme passivo. O pite avança pela dissolução anódica do metal e pela acidificação do interior da cavidade, resultante da hidrólise dos produtos de corrosão. Essa acidificação atrai ainda mais ânions cloreto para dentro do pite, acelerando a corrosão da região atacada [13, 14]. Isso sugere que tal liga apresenta menor resistência à corrosão no meio estudado.
Já a liga inconel 625 apresentou comportamento intermediário, apresentando uma região de passivação localizada entre as do aço inoxidável 316L e do aço duplex 2205.

3 CONCLUSÃO

Diante dos resultados encontrados após os ensaios de polarização potenciodinâmica em meio 3,5% de NaCl, verificou-se que o aço duplex 2205 foi a liga que mais apresentou resistência à corrosão. Tal fato é evidenciado pela extensa região de passivação que acarreta uma camada de óxido mais estável. Enquanto isso, a liga inconel 625 apresentou resistência à corrosão intermediária quando comparada às demais ligas. Por outro lado, o aço inoxidável 316L apresentou uma menor região de passivação com a quebra do filme passivo, fato que torna a liga em questão mais propensa a corrosão por pite.

Agradecimentos

Agradecemos à CAPES, ao CNPq e à FAPERJ pelo apoio financeiro, possibilitando a realização dos experimentos descritos e a confecção deste artigo.

REFERÊNCIAS

1 ALLIED MARKET RESEARCH. Pipeline transportation market size, share, competitive landscape and trend analysis report, by type, by solution type, by services: global

opportunity analysis and industry forecast, 2021-2031. [S.l.]: Allied Market Research, 2023.
2 Gemelli, E. Corrosão de materiais metálicos e sua caracterização. 1. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2001.
3 Alfattah M, Arwati IG, Majlan EH. A review analysis of corrosion rate on stainless steel pipe in sea water media. Miscellaneous. 2024;28(3):567.
4 Tai-Cheng, CHEN; Chau-Chang, CHOU; Hwai-En, LIN; Tung-Yuan, YUNG; Chang-Ting, YANG; Ya-Wen, TSAI. Influence of coating microstructure on the corrosion behavior of Inconel 625 coatings fabricated by different thermal spraying processes. Surface and Coatings Technology, v. 484, 2024.
5 Jinlong, LV. Enhancing the corrosion resistance of the 2205 duplex stainless steel bipolar plates in PEMFCs environment by surface enriched molybdenum. Results in Physics, v. 7, p. 2, 2017.
6 Turner DR, Achterberg EP, Chen C-TA, Clegg SL, Hatje V, Maldonado MT, Sander SG, van den Berg CMG and Wells M. Toward a quality-controlled and accessible Pitzer model for seawater and related systems. Frontiers in Marine Science. 2016;3:139.
7 RIBEIRO, Késia Simões; SOUZA SOARES, Francielly Moura de; VASCONCELOS, Rafael de Almeida; TAVARES, Tamara da Silva; GOMES, Patrick de Lima; ELIAS, Carlos Nelson. Análise comparativa da resistência à corrosão de ligas utilizadas na indústria de óleo e gás. CONGRESSO ANUAL ABM WEEK, 77, 2024.
8 ASTM International. ASTM B444-23 - Standard specification for nickel-chromium-molybdenum-columbium alloys (UNS N06625 and UNS N06852) and nickel-chromium-molybdenum-silicon alloy (UNS N06219) pipe and tube. West Conshohocken: ASTM International; 2023. 5 p.
9 ASTM International. ASTM A790/A790M-24 – Standard Specification for Seamless and Welded Ferritic/Austenitic Stainless Steel Pipe. West Conshohocken: ASTM International; 2024. p. 4.
10 ASTM International. ASTM A312/A312M-24b – Standard Specification for Seamless, Welded, and Heavily Cold Worked Austenitic Stainless Steel Pipes. West Conshohocken: ASTM International; 2024. p. 4.
11 Vidal CV, Muñoz AI. Electrochemical characterisation of biomedical alloys for surgical implants in simulated body fluids. Corrosion Science. 2008;50(7):1954-1961.
12 Wang L, Li H, Liu Q, Xu L, Lin S, Zheng K. Effect of sodium chloride on the electrochemical corrosion of Inconel 625 at high temperature and pressure. Journal of Alloys and Compounds. 2017;703:523-529.
13 Al Saadi S, Yi Y, Cho P, Jang C, Beeley P. Passivity breakdown of 316L stainless steel during potentiodynamic polarization in NaCl solution. Corrosion Science. 2016;111:720-727.
14 Silva, PTG. Desenvolvimento de procedimento e realização de ensaios para avaliação da susceptibilidade à corrosão sob tensão do aço inoxidável Superduplex UNS S 32750 em ambiente com elevada concentração de cloreto. 2012. Disponível em: https://pantheon.ufrj.br/handle/11422/8911. Acesso em: 19 maio 2025.